

光電子分光で見た擬ギャップ

東北大学大学院理学研究科 佐藤 宇史、高橋 隆

これまで、高温超伝導体の電子状態は様々な実験手段や理論によって精力的なアプローチがされてきた。とりわけ、光電子分光は直接電子状態を観測できるという点で、強力な実験手段である。最近、角度分解光電子分光によって $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212)のアンダードープ領域において、超伝導転移温度(T_c)以上の温度で常伝導ギャップ (擬ギャップ) が観測され [1-4]、他の実験で観測される異常や超伝導機構との兼ね合いから精力的な議論がなされてきた。しかしながら、擬ギャップの起源に関しては未だ統一見解が得られていない。この問題に関して、光電子分光のエネルギー分解能を更に高め、 T_c 前後のより詳細な電子状態の温度変化をとらえることが出来れば、擬ギャップの起源に関してのアプローチが可能になると考えられる。更に、擬ギャップは温度減少とともにブリルアンゾーン中の $(\pi, 0)$ 点 (M点)から開き始めることが報告されており [4]、この事は、 $(\pi, 0)$ 点における光電子スペクトルの形状と擬ギャップが密接に関係しているということを表している。つまり、 $(\pi, 0)$ 点付近の光電子スペクトルの系統的測定 (運動量、温度、ドープ量依存性) を行い、解析することによっても、擬ギャップの起源が明らかになると考えられる。また、Bi2212だけではなく、より T_c の低い $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO)においても、アンダードープにおける異常が様々な実験結果から報告されているが、Bi2212で見られる擬ギャップとの対応関係など、意見の同意は得られていない。本研究では、最近東北大学に建設した超高分解能光電子分光装置と放射光施設を併用して行ったBi2212の角度分解光電子分光、LSCOの超高分解能光電子分光の結果について報告し、両者の擬ギャップの起源について考察する。

図1に建設した超高分解能光電子分光装置の概要を示す。この装置の特徴として、大型電子エネルギー分析器、従来型の約100倍の強度をもつマイクロ波型放電管とモノクロメーターの使用による高輝度単色光での測定の実現、さらに、極低温(4K~)での測定、超高エネルギー分解能達成などが挙げられる。特に、エネルギー分解能に関しては、金のフェル

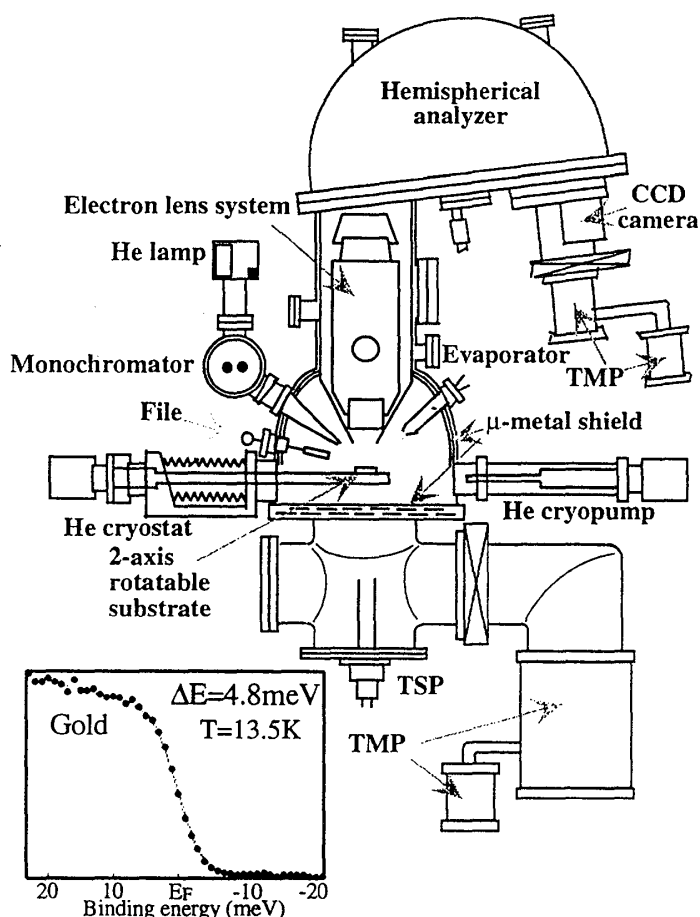


図1 超高分解能光電子分光装置の概要図と、測定した金のフェルミ端の光電子スペクトル

ミ端から見積もられた値が4.8 meVであり（図1挿入図）、世界最高水準を達成している。

Bi2212単結晶試料は、筑波大理工の門脇和男教授、金材技研の茂筑高士博士から、LSCO単結晶試料は、京大化研の山田和芳教授から提供して頂いた。光電子分光実験は、建設した超高分解能光電子分光装置と米国ウィスコンシン放射光施設4m-NIM (Normal Incidence Monochromator) beam lineを用いて行った。光電子分光に必要な清浄表面は超高真空下で試料を劈開することによって得た。

図2に、超高分解能光電子分光装置を用いて測定された最適ドーピングBi2212の(π ,0)点での超高分解能光電子スペクトル($\Delta E=7\text{meV}$)の温度変化を示す。得られた光電子スペクトルは、低温でフェルミ準位近傍に鋭いコヒーレントピークを形成し、温度上昇とともにその強度を落とす一方で、フェルミ準位上の強度は温度上昇とともに系統的に上昇している。それと同時にスペクトルの立ち上がりの中点がフェルミ準位に近づいていくことが明確に観測されており、これはギャップが徐々に閉じていくことに対応する。フェルミ面上の温度変化の詳細な解析の結果、最適ドーピング領域でも擬ギャップが存在し、擬ギャップが閉じる温度 T^* が110Kである事を見出した。また、 T_c 前後のスペクトルの変化に着目すると、コヒーレントピークはちょうど T_c で消え、超伝導相から擬ギャップ相に移り変わるに連れて、スペクトルに何ら不連続な変化が見受けられないことから、擬ギャップは超伝導と密接に関係している先駆現象である可能性が示唆される。コヒーレントピークの幅の解析の結果、分解能7meVでの測定におけるピーク幅は約25meVであり、コヒーレントピークはResolution limitedではないことが明らかになった。さらに、放射光を使った(π ,0)点における光電子スペクトルのドーピング依存性の測定の結果、超伝導ギャップのサイズはキャリアー濃度増加とともに小さくなり、超伝導ギャップのサイズと、角度分解光電子分光で決定した T^* の間に、大まかな比例関係があることがわかった。このことから、擬ギャップは、超伝導と密接に関係し、何らかのペアリングによる可能性が高いことが示唆される。

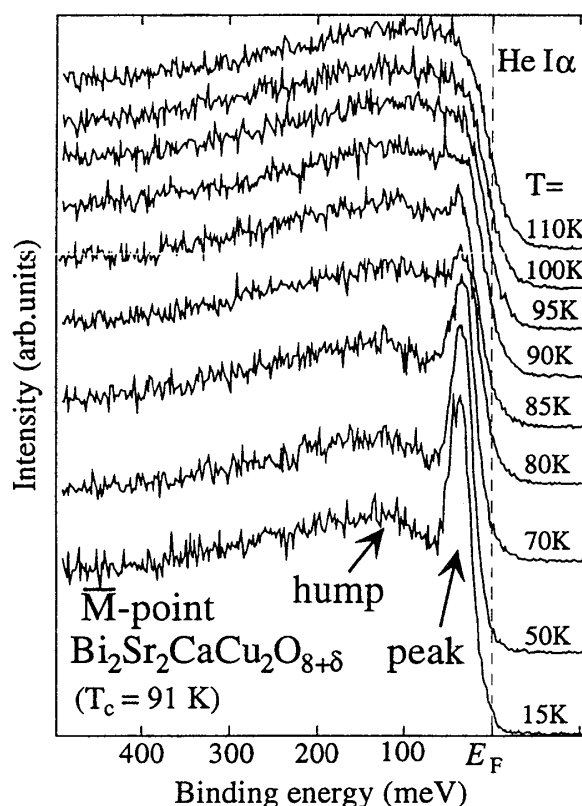


図2 最適ドーピングBi2212($T_c=91\text{K}$)のM点における光電子スペクトルの温度変化

図3(a)に、最適ドーピング $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ ($T_c=38\text{K}$)の超高分解能光電子スペクトルの温度変化を示す（挿入図は金の温度変化）。典型的な金属である金は E_F をはさんで対称的な温度変化を示しているのに対し、LSCOはスペクトルの交点が高結合エネルギー側に位置し、フェルミ準位上の強度が250Kという高温においても系統的に上昇していることがわかる。これは、常伝導状態においてフェルミ準位近傍で状態密度の変化があることを

を意味している。そこで、状態密度の温度変化を明確にするために、スペクトルを装置分解能でコンボリューションした各温度におけるフェルミ分布関数で割ったものを図3(b)に示す。温度上昇とともに、フェルミ準位近傍約30meVの範囲の強度が系統的に上昇しているのに対し、それより高結合エネルギー側の100-150meVの範囲ではスペクトル強度が減少している。これは、温度上昇に伴い、100-150meVから30meV- E_F にスペクトルウェイトの移動があり、低温で開いた擬ギャップが徐々に閉じていくことを意味している。フェルミ準位近傍をより詳しく見ると(図3(c))、スペクトルの温度変化は、常に30-35meVで起こっており、温度によらない。この値は、A.Inoらによる"high-energy pseudogap"[5]のエネルギーの約1/3に対応する。また、超伝導状態の光電子スペクトルからフィッティングで見積もった超伝導ギャップの大きさは8meVであり、観測した擬ギャップのエネルギースケールに比べて数倍小さいことから、この擬ギャップは超伝導ギャップとは起源が異なる事が示唆される。本実験における特徴的なエネルギースケールである30-35meV(温度に換算して ~ 400 K)は

磁化率が最大値を持つ $T_{\max} \sim 400$ K[6]、ホール係数が温度減少とともに増加し始める500K[7]と良く対応していることから、この測定で観測された温度変化は、反強磁性相関の発達に対応するものである事が考えられる。以上のことから、本実験で観測されたLSCOの擬ギャップはBi2212の角度分解光電子分光で観測された、ペアリングが関係していると思われる擬ギャップとは異なっていることが示唆される。今後、二つの擬ギャップの相互関係や起源、さらに超伝導機構との関係を明らかにする必要がある。

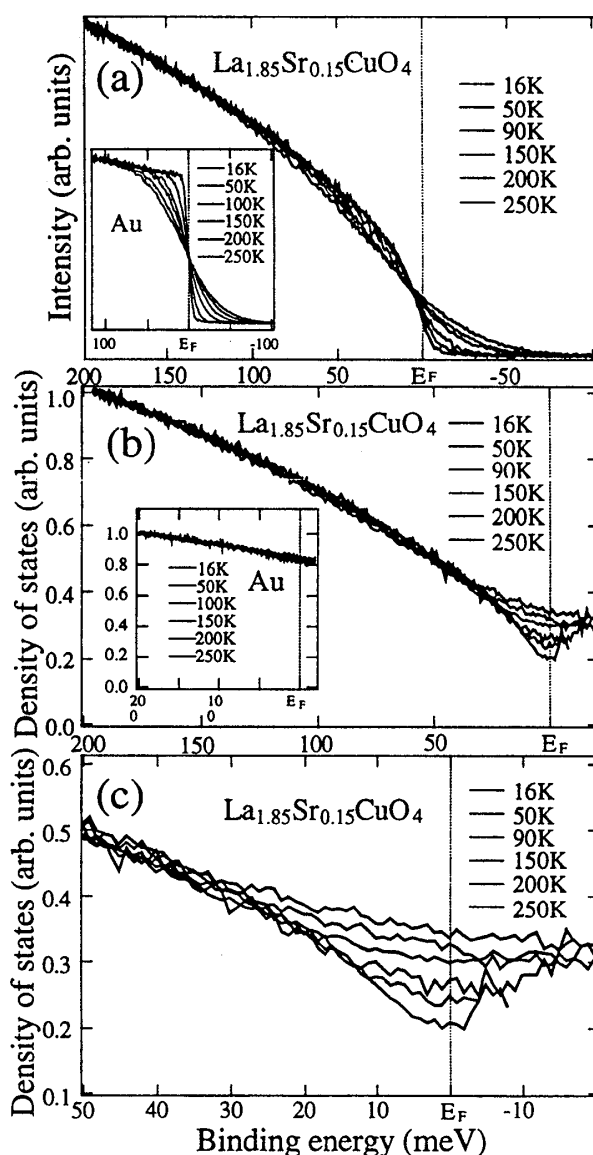


図3 (a)LSCOの E_F 近傍の光電子スペクトル
(b)得られた状態密度, (c)その拡大図

参考文献

- [1] D.S. Marshall et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 4841 (1996).
- [2] H. Ding et al., Nature **382**, 51 (1996).
- [3] A.G. Loeser et al., Science **273**, 325 (1996).
- [4] M.R. Norman et al., Nature **392**, 157 (1998).
- [5] A. Ino et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 2124 (1998).
- [6] T. Nakano et al., Phys. Rev. B **49**, 16000 (1994).
- [7] T. Nishikawa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **63**, 1441 (1994).